

Куберский С. В.*к.т.н., профессор**Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР,***Великоцкий Р. Е.***ведущий инженер**Филиал № 1 «АМК» ООО «ЮГМК», г. Алчевск, ЛНР,***Должиков В. В.***к.т.н., доцент**Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР*

ТРАНСФОРМАЦИЯ СВОЙСТВ НЕ ПРОШЕДШЕЙ ПРОТИВОФЛОКЕНОВУЮ ОБРАБОТКУ ТРУБНОЙ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ЕЁ СТАРЕНИЯ

Трубная сталь, категории прочности К60 (предел прочности $\sigma_B \geq 600$ МПа), принадлежит к группе малоуглеродистых низколегированных сталей (МНС) феррито-перлитного класса. Как правило, при производстве данной стали не возникает особых проблем с обеспечением необходимых механических свойств по прочности и ударной вязкости, однако из-за высоких требований по σ_B иногда возникает отсортировка по относительному удлинению (δ_5). Основным видом брака при производстве данной стали является отсортировка по хладостойкости [1]. Термическая обработка (ТО) горячекатаного толстолистового проката (ГТП) после ускоренного охлаждения выполняется, если необходимо повысить пластичность металла. Такую обработку листов, заключающуюся в нормализации ГТП, т. е. нагреве в аустенитное состояние (выше A_{c3}) и дальнейшем охлаждении на воздухе, производят в методических нагревательных печах. Считается, что процесс старения металла для магистральных труб высокого давления (МТВД) обусловлен диффузионно-контролируемым движением атомов углерода к дефектам решетки и образованием частиц карбидов по границам зерен феррита, что приводит к снижению величины предела макроупругости [2]. С повышением уровня старения, снижается предел макроупругости стали и длительность инкубационного периода коррозионного растрескивания [3]. Отличительной особенностью современной технологической схемы производства данной стали является противфлокеновая обработка непрерывнолитых слябов заключающаяся в их медленном охлаждении в течение нескольких десятков часов для борьбы с образованием флокенов. Чем медленнее протекает охлаждение, тем больше вероятность глубокой очистки стали от водорода, снятия внутренних напряжений и меньше вероятность образования флокенов [4]. Продолжительность противфлокеновой обработки (ПФО) разнообразных сталей, полученных на разных агрегатах и заводах, колеблется в широких пределах [5].

Основной целью данных исследований был анализ влияния ПФО, ТО и старения на свойства трубной стали, категории прочности К60.

Для решения поставленной цели в условиях действующего производства были исследованы листы одной плавки стали 10Г2ФБЮ, выплавленной в кислородном конвертере комбинированного дутья емкостью 300 т и разлитой на двухручьеваой МНЛЗ в слябы сечением 220×1200 мм. Единственное отличие при производстве данной плавки от стандартной технологии заключалось в том, что медленное их охлаждение в штабелях на протяжении 72 ч со скоростью ~10–15 °С/ч не производилось. Слябы были разложены на холодном полу (температура в ККЦ около минус 5 °С) и остыли с 950 °С до 40–50 °С примерно за 10–12 ч, т. е. средняя скорость охлаждения литого сляба составила ~80–100 °С/ч. В дальнейшем данные слябы были нагреты в методической печи блюминга и подвергнуты стандартному термомеханическому контролируемому процессу (ТМКП) на стане «3000», в соответствии с существующими техническими условиями [6]. Определение количества вязкой составляющей (КВС) образцов из проката, выполняли при испытании падающим грузом (ИПГ) стандартных образцов с прессованным надрезом по ГОСТ 30456-97 при температуре минус 20 °С на

копре УМУ-10000. Определение химического состава образцов выполняли спектральным методом на установке Spectrolab.

Анализ механических свойства данного металла показал, что они находятся в пределах нормы, за исключением хладостойкости. КВС при ИПГ имело значения 5–10 %, при норме ≥ 80 %.

Для определения влияния ТО на механические свойства исследуемого металла с использованием стандартных методик были отобраны опытные образцы. В процессе ТО все образцы нагревались в муфельной печи в течение 30 мин, при температуре 915 °С, затем охлаждались на воздухе до температуры на 20 °С выше (740 °С) и на 40 °С ниже (680 °С) температуры эвтектоидного превращения A_{c1} , которая по формуле Гольдштейна [7] составила 720 °С. Далее образцы помещали в муфельные печи и выдерживали по 30 мин при этих температурах. После каждого нагрева и выдержки, образцы охлаждали до комнатной температуры со скоростью 10 °С/мин, 5 °С/мин и 1 °С/мин.

Механические свойства исследованной плавки, полученные после ТО, представлены в таблице 1.

В соответствии с данными таблицы 1, при снижении скорости охлаждения с 10 °С/мин до 1 °С/мин наблюдается уменьшение временного сопротивления с 525–529 МПа до 478–493 МПа (примерно на 50 МПа), повышение относительного удлинения с 30,5 % до 35 % (на 4–5 %), а ударной вязкости на 30–70 Дж/см² с 172–195 Дж/см² до 246–255 Дж/см² (КСV⁻²⁰), и с 191–210 Дж/см² до 226–234 Дж/см² (КСU⁻⁷⁰). Предел текучести практически не изменился. КВС уменьшилось с 10 % до 0–5 %, по сравнению с исходным состоянием металла для всех режимов ТО, за исключением режима № 2.

После термической обработки металл полностью охрупчился (КВС=0–5 %), однако, после режима ТО № 2, количество вязкой составляющей при ИПГ увеличилось в 2,5 раза, с 10 % до 25 % (табл. 1). Снижение хладостойкости с 10 % до 0 % КВС образцов исследованной плавки после проведенной ТО, по нашему мнению, невозможно объяснить существующими в настоящее время представлениями [8] о природе и механизме водородного охрупчивания МНС.

Поэтому в ходе последующих исследований с интервалом 2–3 недели от даты выплавки анализируемого металла, в течение 38 недель проводили определение КВС при ИПГ используя образцы, отобранные от листов проката, хранящихся на складе металла.

Результаты исследований КВС при ИПГ, после старения в течение 38 недель ГТП исследуемой плавки, представлены на рисунке 1.

Анализ представленных на рисунке 1 данных свидетельствует о том, что в течение первых 20 суток после ТМКП, хладостойкость металла увеличилась с 10 % до 20 % КВС (участок А–В на рис. 1). Скорее всего, это свидетельствует о незавершенной и продолжающейся диффузии атомарного водорода (Н) из феррита и его дальнейшей адсорбции, в результате чего давление молекулярного водорода (Н₂) в коллекторах снижается, и, как следствие, приводит к повышению КВС примерно на 10 %.

Таблица 1 — Механические свойства проката после ТО

Механические свойства	Исходное состояние	Скорость охлаждения, °С/мин					
		10		5		1	
		Температура нагрева, °С					
		680	740	680	740	680	740
№ режима ТО							
КВС, %	10	5	25	5	0	5	0
σ_B , МПа	659	525	529	515	519	493	478
σ_T , МПа	557	345	350	361	368	366	342
δ_5 , %	21,5	30,5	30,5	29,5	28,5	35,5	34
КСV ⁻²⁰ , Дж/см ²	194	172	195	197	140	246	255
КСU ⁻⁷⁰ , Дж/см ²	218	191	210	193	238	234	226

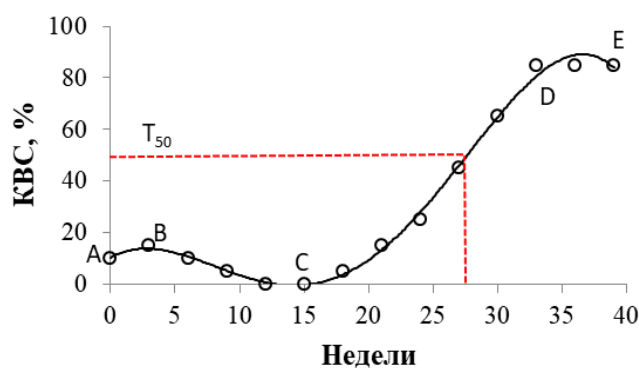


Рисунок 1 — Изменение КВС в процессе старения образцов, не прошедших ПФО

В течение последующих 12 недель старения (участок В–С на рис. 1), наблюдается снижение КВС с 20 % до 0 %. По-видимому, водородная хрупкость металла на втором участке определяется, не давлением H_2 , сегрегированного в коллекторах, и не средней концентрацией H , растворённого в решётке феррита, а увеличением концентрации H_2 и др. газов в зоне максимальных объёмных напряжений кристаллической решётки.

Начиная с 15-й недели старения (участок С–D на рис. 1), наблюдается повышение хладостойкости с 0 % до 85 % КВС. Данное резкое повышение хладостойкости, вероятнее всего, является следствием релаксации микрообластей в приграничной зоне межфазной границы цементит/феррит, что приводит к последующей стабилизации хладостойкости на удовлетворительном уровне, в результате старения термически, деформационно и фазово напряжённого металла (напряжения II и III рода).

Примерно после 33-й недели старения металл приобретает хладостойкость на уровне 85 % КВС (участок D–E на рис. 1), что очевидно свидетельствует о завершении процессов релаксации микрообластей в приграничной зоне межфазной границы цементит/феррит обусловленных напряжениями II и III рода.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что при отсутствии ПФО непрерывнолитых слябов, предусматривающей их замедленное охлаждение, не обеспечивается требуемый уровень хладостойкости. ТО этого металла по различным режимам нагрева, выдержки и охлаждения не оказывает существенного позитивного влияния на хладостойкость. Анализ изменения КВС в процессе старения листового проката из стали К60 на протяжении 38 недель позволил выделить 4 характерных участка и предложить механизм их образования. Показано, что после 33-й недели старения металл приобретает хладостойкость на уровне, удовлетворяющем большинство существующих в настоящее время стандартов и этот процесс, может использоваться производителями в случае невозможности проведения предусмотренного технологией замедленного охлаждения непрерывнолитых слябов для обеспечения необходимых требований по хладостойкости.

Список литературы

1. Куберский, С. В. Влияние химического состава и микроструктуры трубной стали класса прочности К60 на её хладостойкость / С. В. Куберский, Р. Е. Великоцкий // Сборник научных трудов ДонГТИ — 2021. — № 24 (67). — С. 54–60.

2. Горицкий, В. М. Восстановленные нефтегазопроводные трубы повторного применения для конструкций четвертой группы / В. М. Горицкий, Г. Р. Шнейдеров // Промышленное и гражданское строительство. — 2021. — № 2. — С. 24–33.

3. Оценка степени обезводороживания листовой стали повышенной прочности при контролируемой прокатке / Л. А. Рябичева, В. И. Алимов, Ю. С. Колчина, Е. Э. Павлюченко // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. — 2019. — № 3 (28). — С. 18–26.

4. Повышение эффективности противоблоковой обработки непрерывнолитых заготовок / А. И. Троцан, И. Л. Бродецкий, Г. А. Кашира, О. Е. Полозюк // Вісник Приазовського державного технічного університету. — 2001. — Вип. 11. — С. 1–5.
5. Карпенко, Г. В. Влияние водорода на свойства стали / Г. В. Карпенко, Р. И. Крипякевич. — М. : Metallurgizdat, 1962. — 196 с.
6. ТУ 14-1-5493-2004. Прокат толстолистовой из низколегированной стали классов прочности К52-К60 и Х56-Х70 для электросварных труб на рабочее давление от 5,4 до 7,4 МПа. — М. : ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина», 2014. — 34 с.
7. Trzaska, J. Modelling of CCT diagrams for engineering and constructional steels / J. Trzaska, L. A. Dobrzanski // Journal of Materials Processing Technology. — 2007. — Vol. 192–193. — P. 504–510. — DOI 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.099.
8. Влияние способа изготовления проката из стали типа 10Г2ФБ на микроструктуру, механические свойства и хладостойкость после отжига при температурах полной и неполной фазовой перекристаллизации / П. Г. Мартынов, М. Ю. Матросов, А. Б. Григорьева [и др.] // Проблемы черной металлургии и материаловедения. — 2016. — № 3. — С. 80–87.